



# Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance a long terme : exemple de la Loire moyenne. Daily variability and its implication on long term river water quality surveys : the Middle Loire example

Florentina Moatar, Michel Meybeck, Alain Poirel

## ► To cite this version:

Florentina Moatar, Michel Meybeck, Alain Poirel. Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance a long terme : exemple de la Loire moyenne. Daily variability and its implication on long term river water quality surveys : the Middle Loire example. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2009, 4, pp.91-99. 10.1051/lhb/2009050 . insu-00413668

**HAL Id: insu-00413668**

**<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00413668>**

Submitted on 25 Oct 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance à long terme : exemple de la Loire Moyenne

## Daily variability and its implication on long term river water quality surveys: the Middle Loire example

**Florentina Moatar**

Université François-Rabelais de Tours, CNRS/INSU UMR 6113 ISTO, Université d'Orléans  
Université François-Rabelais de Tours, Faculté des Sciences et Techniques  
Parc de grandmont, F 37200 Tours  
Tél: +33 (0)2 47 36 73 16, Fax: +33 (0)2 47 36 70 90, e-mail: [florentina.moatar@univ-tours.fr](mailto:florentina.moatar@univ-tours.fr)

**Michel Meybeck**

UMR Sisyphe 7619, Université Paris VI, boîte 105  
4 place Jussieu, F 75006 Paris  
Tél: +33 (0)1 44 27 51 48, Fax: +33 (0)1 44 27 51 48, e-mail: [michel.meybeck@upmc.fr](mailto:michel.meybeck@upmc.fr)

**Alain Poirel**

EDF-DTG, Grenoble  
Tél: 04 76 20 20 51, [alain.poirel@edf.fr](mailto:alain.poirel@edf.fr)

### Résumé

*La variabilité journalière de la qualité des eaux est une composante importante de la variabilité temporelle générale, mais rarement analysée. Les suivis en continu réalisés aux centrales nucléaires de production électrique (CNPE) depuis leur création permettent d'appréhender les variations de qualité (T°, O<sub>2</sub>, pH, conductivité électrique) aux échelles de temps les plus fines et mettent en évidence les erreurs commises avec des suivis discrets. Dans cette communication, dans un premier temps, nous montrons quelques exemples de cette variabilité temporelle sur la Loire moyenne : influence de la crue de mai 1992 sur la physico-chimie des eaux de la Loire moyenne, cycles nycthémeraux d'oxygène dissous et de pH liés à la photosynthèse algale en Loire Moyenne, influence de la dénitrification sur les teneurs estivales de nitrate en Loire moyenne, influence du réchauffement atmosphérique sur la température des eaux de la Loire moyenne. Dans un second temps, nous montrons les limites du suivi discret tel qu'il est pratiqué couramment dans le cadre réglementaire (INP, RNB, RCS) pour des variations cycliques journalières de l'oxygène dissous, du pH, de la température de l'eau, puis saisonnières et inter-annuelles.*

### Abstract

*The sub-daily water quality variation is an important component of temporal river quality variation, yet rarely considered for lack of continuous records. Such records are available on the Middle Loire from the regular continuous survey at nuclear power plants for temperature, dissolved oxygen, pH and electrical conductivity. Such very fine scale temporal variation is analysed for the Middle Loire circa 40 000 km<sup>2</sup> (circa 300 km<sup>2</sup>) at 4 stations showing: i) diurnal cycles of T°, dissolved oxygen, pH and electrical conductivity are forced by daily atmospheric temperature and solar radiation, ii) the amplitude of these cycles increase in spring and summer and are specific to each water quality determinant, iii) eutrophication is intense in this river reach and the daily O<sub>2</sub> and pH variations exceeds those of the seasonal variations, iv) late spring floods (e.g. Mai 1992) may destroy the diurnal cycles, v) on summer nitrate levels are close to zero, denitrification is a possible cause in addition to algal uptake, vi) long term temperature increase from 1976 to 2003 2° for the annual mean and 3° for the summer mean only. Discrete regularly monthly and bimonthly surveys of rivers totally ignore fine scale variations of temperature, dissolved oxygen, pH and conductivity and/or result in biases and large uncertainties on averages.*

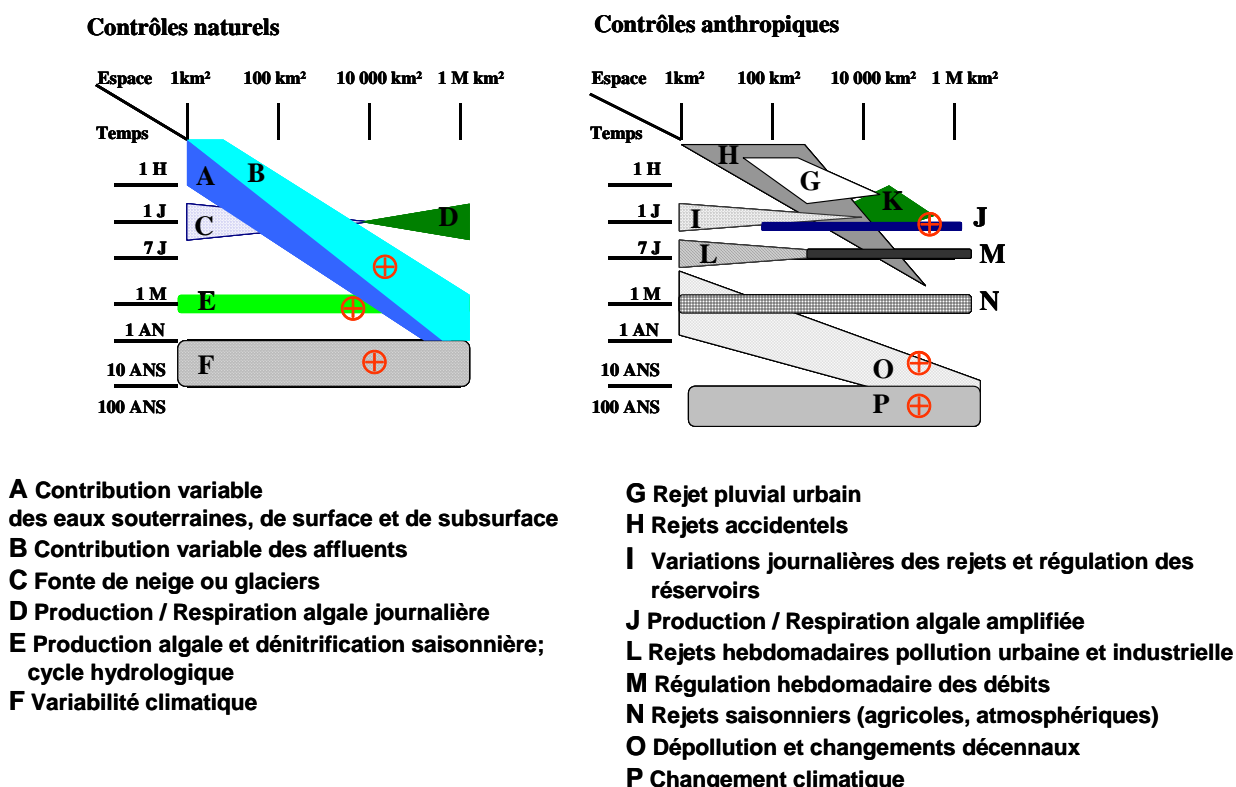
## 1. Introduction

La variabilité temporelle de la qualité du milieu fluvial est généralement basée sur des informations discontinues réalisées avec une fréquence relativement faible sur lesquelles on s'attache à déterminer des cycles, des tendances et des correspondances avec la variabilité hydrologique qui, elle, est généralement connue de façon continue. Une typologie des facteurs de contrôle de la variabilité temporelle biogéochimique des systèmes fluviaux est proposée ci-après selon diverses échelles de temps et d'espace sous l'effet des facteurs de contrôles naturels (Figure 1 A à F) et anthropiques (Figure 1 G à P) ([1]).

En milieu faiblement anthropisé, dans les bassins versants élémentaires, la composition physico-chimique des rivières dépend de la proportion des eaux souterraines, de surface et de sub-surface lors des

événements de crues qui génèrent des variations très fines (horaire ou journalière) (A). Dans les bassins plus grands ( $> 1000 \text{ km}^2$ ), l'hétérogénéité spatiale des sous-bassins (lithologie, régime) génère des eaux de compositions différentes dont le mélange produit une variabilité de la qualité pendant les crues (B). Les variations cycliques de 24 h (nycthémérales) (C) sont rencontrées principalement dans deux situations : dans les rivières à fonte de neiges ou de glaces (comme pour les MES, [2], [3] ou à production primaire importante liée aux cycles de production/respiration du phytoplancton et bactéries comme aux exutoires de lacs (D). Des cycles biogéochimiques, liés aux processus d'interface sol-végétation conduisent à des variations saisonnières comme la production algale et la dénitrification (E), [4]. La variabilité biogéochimique interannuelle (F) est principalement liée à la variabilité climatique [5], [6] et à l'aléa hydrométéorologique, cette dernière, très importante dans les bassins méditerranéens [7].

Dans les bassins versants anthropisés, les apports accidentels anthropiques génèrent des variations qui se superposent aux précédentes. On peut mentionner : i) les variations sub-journalières (H) liées à l'impact des effluents urbains mixtes par temps de pluie (déversoirs d'orage) [8] que produit des fluctuations de qualité des eaux brutales dépendantes des proportions relatives entre le débit fluvial et celui des eaux ruisselées [9], ii) les variations journalières (I) liées aux cycles d'épuration des effluents urbains ou industriels et à la régulation journalière des débits par les réservoirs (J). Les caractéristiques du milieu aquatique contrôlées par le processus d'eutrophisation, surtout dans les rivières de plaine des bassins de tailles moyenne et grande, présentent des cycles amplifiés jours/nuits (D) [10]. Des variations hebdomadaires, mensuelles peuvent résulter des cycles d'épuration urbaine ou industrielle (impact L), de la régulation des débits (M) pour la demande d'eau et d'énergie hydroélectrique. Les variations saisonnières (N) sont souvent liées aux pratiques agricoles. L'analyse des tendances vise à mettre en évidence les effets des programmes d'intervention sur l'épuration des eaux résiduaires et industrielles et des pratiques agricoles raisonnées de la reforestation (O) et l'influence du changement climatique (P) [11].



**Figure 1.** Facteurs de contrôle naturels et anthropiques de la variabilité biogéochimique des systèmes fluviaux (modifié d'après [1]). ⊕ : facteurs de contrôle illustrés ci-après la Loire Moyenne

Les suivis en continu réalisés aux centrales nucléaires de production électrique (CNPE) depuis leur création permettent d'appréhender les variations de qualité ( $T^\circ$ ,  $O_2$ , pH, conductivité électrique) aux échelles de temps les plus fines et mettent en évidence les erreurs commises avec des suivis discrets.

Dans cette communication, dans un premier temps, nous montrons quelques exemples de cette variabilité temporelle sur la Loire moyenne : influence de la crue de mai 1992 sur la physico-chimie des eaux de la Loire moyenne (B), cycles nycthéméraux d'oxygène dissous et de pH liés à la photosynthèse algale en Loire Moyenne (J), influence de la dénitrification sur les teneurs estivales de nitrate en Loire moyenne (E),

influence du réchauffement atmosphérique sur la température des eaux de la Loire moyenne (**F et P**), dépollution et changements décennaux pour les variables liées à l'eutrophisation de la Loire Moyenne (**O**). Dans un second temps, nous montrons les limites du suivi discret tel qu'il est pratiqué couramment dans le cadre réglementaire (INP, RNB, RCS) pour des variations cycliques journalières de l'oxygène dissous, du pH, de la température de l'eau, puis saisonnières et inter-annuelles.

## 2. Loire Moyenne

La Loire moyenne, située entre les confluences Loire-Allier et Loire-Vienne (Figure 2) est un fleuve sensible à l'eutrophisation et au réchauffement des eaux, de par sa distance à la source (le plus long fleuve de France), la nature même du régime hydrologique (étiages sévères), sa configuration morphologique (lit large, faibles profondeurs, vitesses faibles), sans oublier les activités humains (rejets urbains, agricoles, industriels):

C'est aussi un tronçon très bien suivi car certaines stations de contrôle de l'impact des CNPE opèrent par EDF en continu depuis plus de 20 ans à Belleville, Dampierre, Saint-Laurent-des-Eaux et Avoine (Figure 2). Nous avons aussi utilisé les stations régulières mensuelles ou bimensuelles du réseau national de bassin (RNB) qui fait suite à l'Inventaire national de la pollution (INP) installé en 1971, et la chronique exceptionnelle des données quasi-journalières de la station Quai du Roi de 1981 à 1985 ([12]).

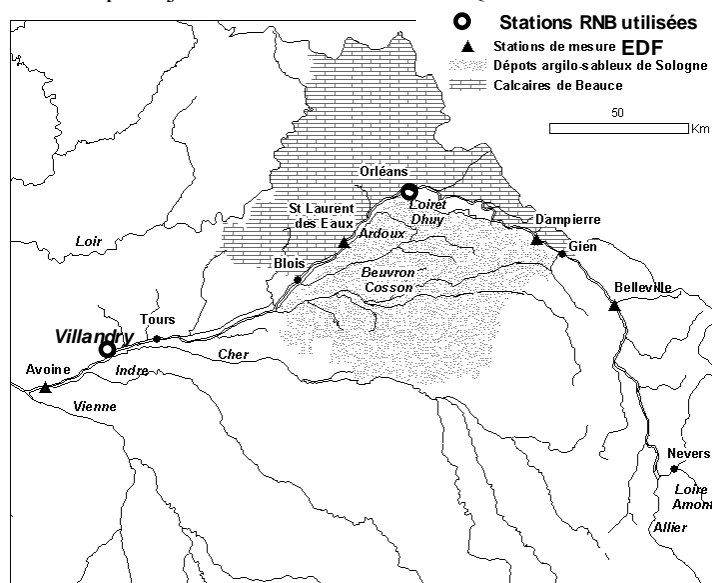


Figure 2. Localisation de la Loire Moyenne et stations de suivi hydroécologiques des CNPE (Belleville, Dampierre, Saint Laurent-des-Eaux, Avoine) et du RNB (Orléans, Villandry)

## 3. Cycles saisonniers de la qualité des eaux

### 3.1. Régime des nutriments et de la chlorophylle

Les « régimes fluviaux » sont couramment utilisés en hydrologie pour décrire les variations des valeurs mensuelles moyennes observées sur plusieurs années. Plus la variation interannuelle est grande plus la période d'observation requise devra être grande. Dans la Loire Moyenne (Orléans) le régime des nutriments est établi sur 1600 à 2400 échantillons, suivant les variables, pendant 18 ans. On considère l'ensemble des concentrations pour un même mois et on détermine les quantiles (10%, 50% et 90%) (Figure 3). On fait alors l'hypothèse implicite que la tendance à long terme sur cette période est négligeable par rapport à la variation saisonnière testée. Cette approche met en évidence une grande saisonnalité de la chlorophylle a, des orthophosphates et des nitrates liée aux cycles climatiques et hydrologiques (Figure 3).

- La chlorophylle a, qui correspond à la biomasse algale planctonique, présente un pic estival marqué (Figure 3a) . Elle ne prend pas en compte la biomasse des algues fixées (diatomées benthiques). D'une année à l'autre la variation de la chlorophylle a peut être très différente suivant la précocité du printemps ou la longueur de l'été et la nature des floraisons algales (M. Leita, comm. personnelle,[13], [14], [15]). Il en résulte des variations interannuelles importantes en mai, juin et octobre.
- Les orthophosphates (Figure 3b) présentent une variation inverse du fait de leur utilisation par la biomasse algale. En été ils sont le plus souvent complètement épuisés, c.à.d. inférieurs à la limite de détection, élevée, du RNB (O. Coulon, comm. personnelle). On l'interprète comme résultant de la consommation par les algues.

- Les nitrates (Figure 3c) présentent aussi une diminution estivale marquée. Toutefois la production algale ne peut que partiellement rendre compte de leur épuisement car à un pic de 150  $\mu\text{g/l}$  de chlorophylle a, l'« uptake » de nitrate ne correspond qu'à 0.8 mg N- $\text{NO}_3^-/\text{l}$  alors que la variation saisonnière (delta N- $\text{NO}_3^-$ ) est bien plus élevée de l'ordre de 2.5 mg N/l. Un autre mécanisme doit donc être invoqué. Il ne peut s'agir ici de participation des eaux de la nappe des calcaires de Beauce (Figure 2) car d'une part elle alimente la Loire surtout après Orléans, d'autre part elle est riche en nitrate mais plutôt d'une dénitrification quasi-totale pendant l'été estival dans le corridor ligérien. Ce processus qui caractérise aussi les régimes de nitrates sur le bassin de la Seine a été bien mis en évidence par un traçage isotopique [16].

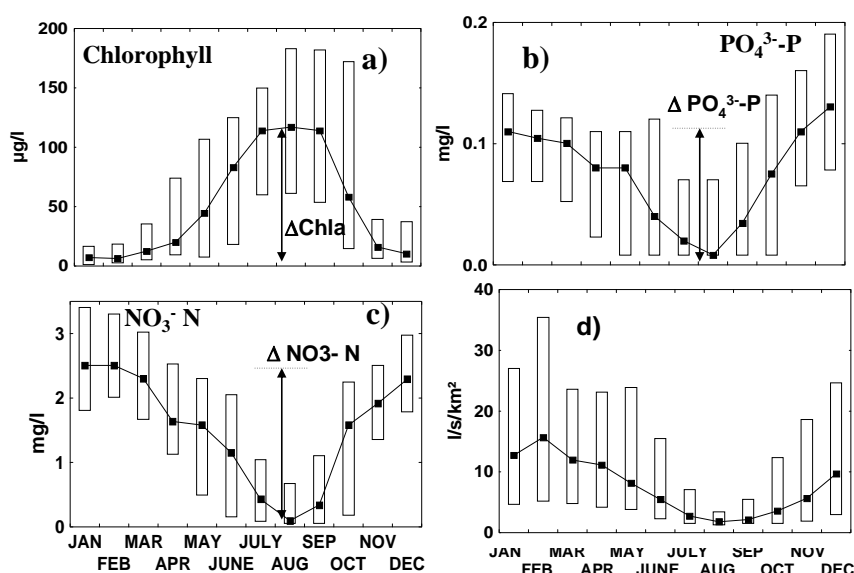
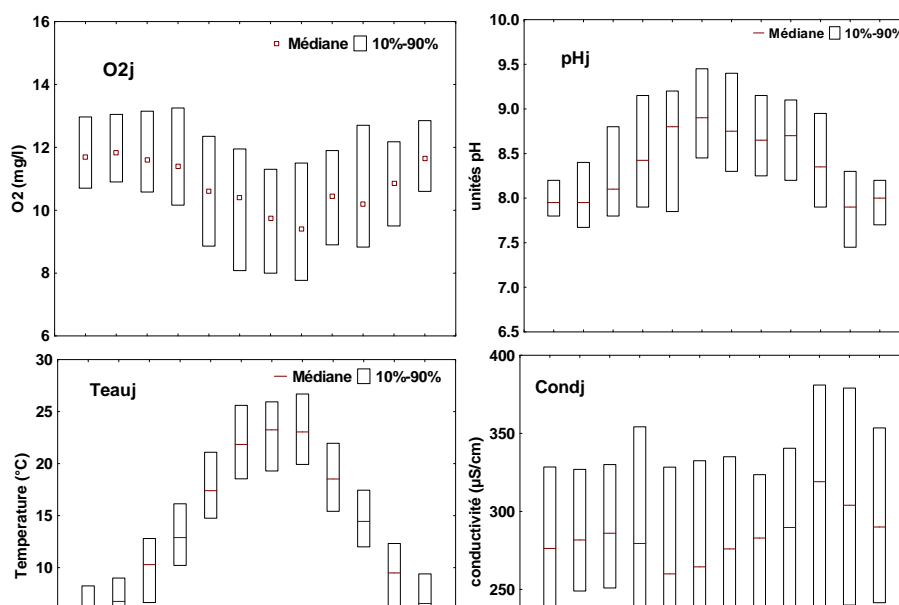


Figure 3. Variations saisonnières des valeurs journalières de : a) chlorophylle a, b)  $\text{P-PO}_4^{3-}$ , c)  $\text{N-NO}_3^-$ , d) débits journaliers spécifiques : la Loire en amont d'Orléans, Quai du Roi, période 1981 à 2003, [12]. Contrôle E (Figure 1)

### 3.2. Régime des indicateurs physico-chimiques (T, O<sub>2</sub>, pH, conductivité)

La métrique de la saisonnalité des 4 indicateurs physico-chimiques suivis en continu, est exprimée par la distribution des moyennes journalières au pas de temps mensuel (Figure 4). Chaque boîte représente les déciles 10% - 90% et les médianes de la population des moyennes journalières (O<sub>2j</sub>, pH<sub>j</sub>, T<sub>j</sub> et Cond<sub>j</sub>) pour un mois donné sur l'ensemble de la période étudiée (1990-2005) en supposant négligeables les tendances à long terme sur cette période. L'amplitude annuelle des températures ( $\Delta T_{\text{min/max}}$ ) est de 18 °C (min 6°, max 23°C) ; celle de l'oxygène dissous est de 2.4 mg/l d'O<sub>2</sub> (min 9.5, max 11.6 mg/l). Elle suit un cycle opposé à celle des températures en raison de la solubilité plus forte d'O<sub>2</sub> dans les eaux froides. L'amplitude annuelle des pH est de 0.8 unités (minimum 7.95, max 8.85) et celle des conductivités de 60  $\mu\text{S/cm}$  (minimum 260, maximum 320  $\mu\text{S/cm}$ ).



**Figure 4. Saisonnalité des moyennes journalières d'oxygène dissous, pH, température, conductivité : Loire à Avoine, période 1993 – 2005. Contrôle E**

Les valeurs extrêmes mensuelles entre ces 4 variables ne sont pas absolument synchrones illustrant la complexité entre le pH et la production primaire algale qui influe un peu sur les valeurs d'O<sub>2</sub> journaliers et entre le pH et les équilibres calco-carbonés responsables d'une précipitation estivale de la calcite [17], [18] donc une chute de la conductivité.

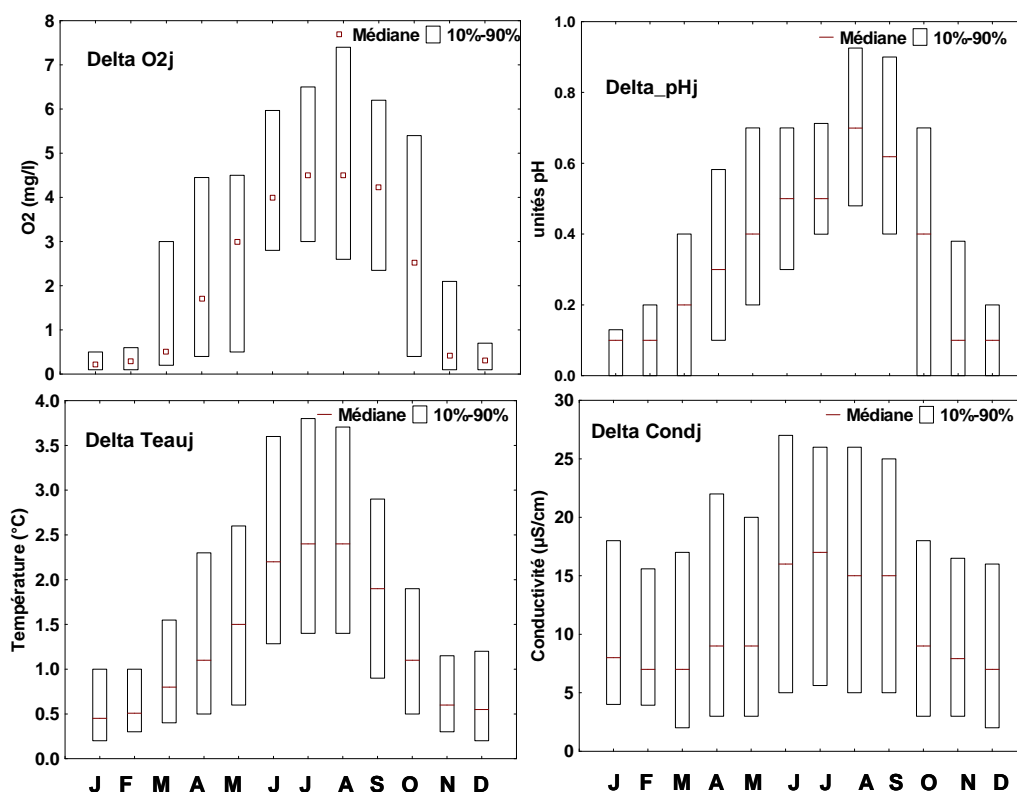
## 4. Cycles journaliers

Les données recueillies «en continu» aux CNPE, en fait archivées au pas de temps de 1 heure par EDF, sont d'abord traitées pour corriger les valeurs aberrantes et les dérives des sondes [19] puis traitées. La métrique choisie ici est l'amplitude journalière deltaT<sub>j</sub>, delta pH<sub>j</sub>, etc.

### 4.1. Variation saisonnières des amplitudes journalières (T°, O<sub>2</sub>, pH et conductivité)

La population des amplitudes journalières de chaque mois pour l'ensemble de la période 1993-2005 est classée (10%, 50%, 90%) pour chacun des 4 indicateurs (Figure 5). Un cycle typique (1 juillet 2006), présenté à la section suivante (Figure 7), montre que les cycles de T°, O<sub>2</sub>, pH et conductivité ne sont pas absolument synchrones, par exemple le minimum d'O<sub>2</sub> est observé 3 h avant le minimum de température mais il est synchrone avec celui du pH. Le cycle de la conductivité est décalé.

Les médianes des amplitudes thermiques varient de 0.45°C en janvier à 2.4°C en juillet, celles de l'oxygène dissous de 0.15 mg/l en janvier à 4.5 mg/l en juillet, celles du pH de 0.1 unités en janvier à 0.7 unité en août, enfin celles de la conductivité de 8 µS/cm en janvier à 17 µS/cm en juillet. Ces amplitudes journalières peuvent varier beaucoup pour un même mois au printemps (O<sub>2</sub>, pH), en été (T°) et à l'automne (O<sub>2</sub>, pH); l'écart entre les déciles est en général moins marqué en hiver surtout pour delta O<sub>2j</sub>, delta pH<sub>j</sub> et delta T<sub>j</sub>. Mais cette variation hiver/été est peu apparente pour la conductivité. Si on converti le pH en ions H<sup>+</sup> on observe que les variations journalières maximales atteignent 1 ordre de grandeur (1 unité pH).

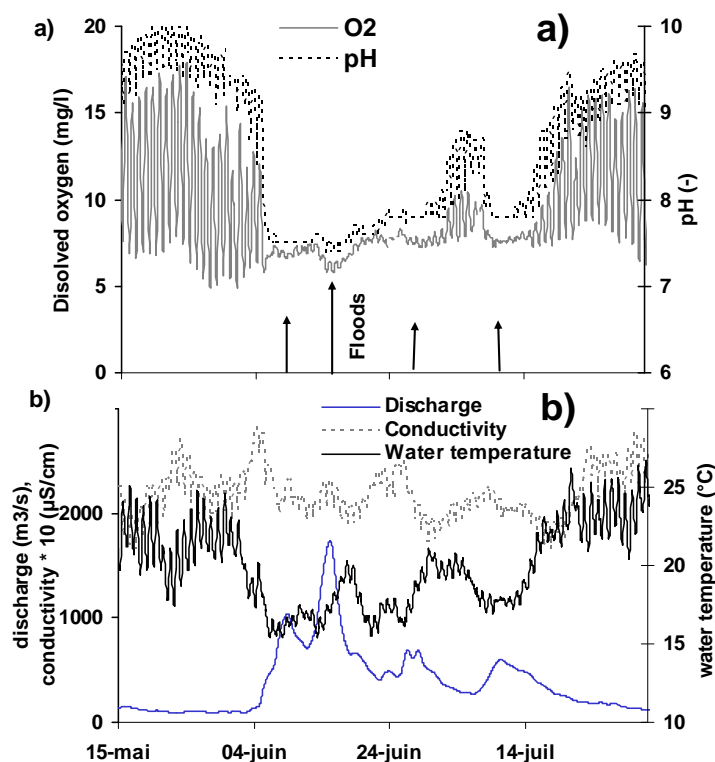


**Figure 5. Saisonnalité des amplitudes journalières d'oxygène dissous, pH, température, conductivité : Loire à Avoine, période 1993 – 2005.**

Au sein de la même journée les écarts d'O<sub>2</sub> dissous (Delta O<sub>2j</sub>) peuvent atteindre 7mg/l et ceux du pH, (Delta pH<sub>j</sub>) 0.9 unités ; dans les deux cas ils sont supérieurs aux écarts saisonniers basés sur les moyennes journalières. Cette propriété est une caractéristique des milieux aquatiques très eutrophes. Contrôles D et J.

#### 4.2. Impact des crues sur les cycles journaliers O<sub>2</sub>, pH

L'eutrophisation génère des cycles journaliers très marqués d'oxygène dissous et de pH. Un épisode de crue printanier, situé en pleine période de croissance algale, peut détruire ces cycles, ainsi la crue du 4 au 20 juin 1992 à Dampierre (Figure 6). Les cycles d'O<sub>2</sub> passent de Delta O<sub>2j</sub> = 7 mg/l avant la crue à Delta O<sub>2</sub> < 0.3 mg/l pendant la crue. Les cycles de pH passent de 0.6 unités avant à zéro pendant la crue. La variation de la conductivité électrique présente une diminution avec les débits, phénomène quasiment universel. La sonde affiche une variabilité journalière qui pourrait être due à la précipitation de la calcite lorsque les pH dépassent 8.2 mais elle affiche aussi une variabilité pendant la crue qui n'est pas encore expliquée. On remarque que les cycles journaliers de température sont aussi affectés : Delta T<sub>j</sub> ≈ 3°C avant la crue à Delta T<sub>j</sub> ≈ 0.5°C pendant la montée des eaux.



**Figure 6. Evolution des variables physico-chimiques pendant la crue d'été de la Loire à Dampierre (période : 15 mai 1992 à 1 août 1992): a) cycles journaliers d'O<sub>2</sub> et du pH, b) variation de la conductivité et de la température (illustration contrôle B)**

Les valeurs moyennes mensuelles des Delta T<sub>j</sub> ainsi que les valeurs minimales et maximales de ces amplitudes journalières a également été analysée pour la période 1990-2005. La saisonnalité des amplitudes est très reproductible d'année en année mais on observe certaines années caractérisées par des crues de printemps des encoches printanières dans cette variation comme en 1990, 1992, 1993 et 1997.

**Les organismes aquatiques sont donc soumis à des variations journalières de température qui sont de l'ordre du quart de la variation saisonnière. Pour l'oxygène dissous les variations journalières au printemps et en été sont plus fortes que les variations saisonnières. Un exemple typique de ces variations journalières est présenté à la Figure 7b pour le 1 juillet 2006.**



## 5. Biais et imprécisions des prélèvements ponctuels par rapport aux moyennes journalières

Dans le cas des cycles journaliers marqués, la position de l'heure du prélèvement pour des suivis discontinus de type INP/RNB/SEEE, contribue à : i) une grande imprécision sur les mesures dans le cas où les horaires de prélèvements sont très variables : cas du suivi de 1998-2003 qui est dispersé entre 11h et 18 h. Ceci peut induire une différence de  $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$  suivant les tournées par rapport à la moyenne journalière, ou ii) un biais marqué lorsque les horaires sont fixes ; cas du suivi 1978-1980 qui sous-estime la valeur moyenne à cette station de  $0.7^{\circ}\text{C}$ . Les horaires fixes seraient plus recommandés car les tendances et les variations saisonnières restent précises, par contre les moyennes annuelles doivent être redressés des biais. Pour être représentatif de la valeur moyenne de la journée, l'observation devrait être ici réalisée à 12h et 24 h pour O<sub>2</sub> et pH, 3 et 15 h pour la température et 6h et 18h pour la conductivité !

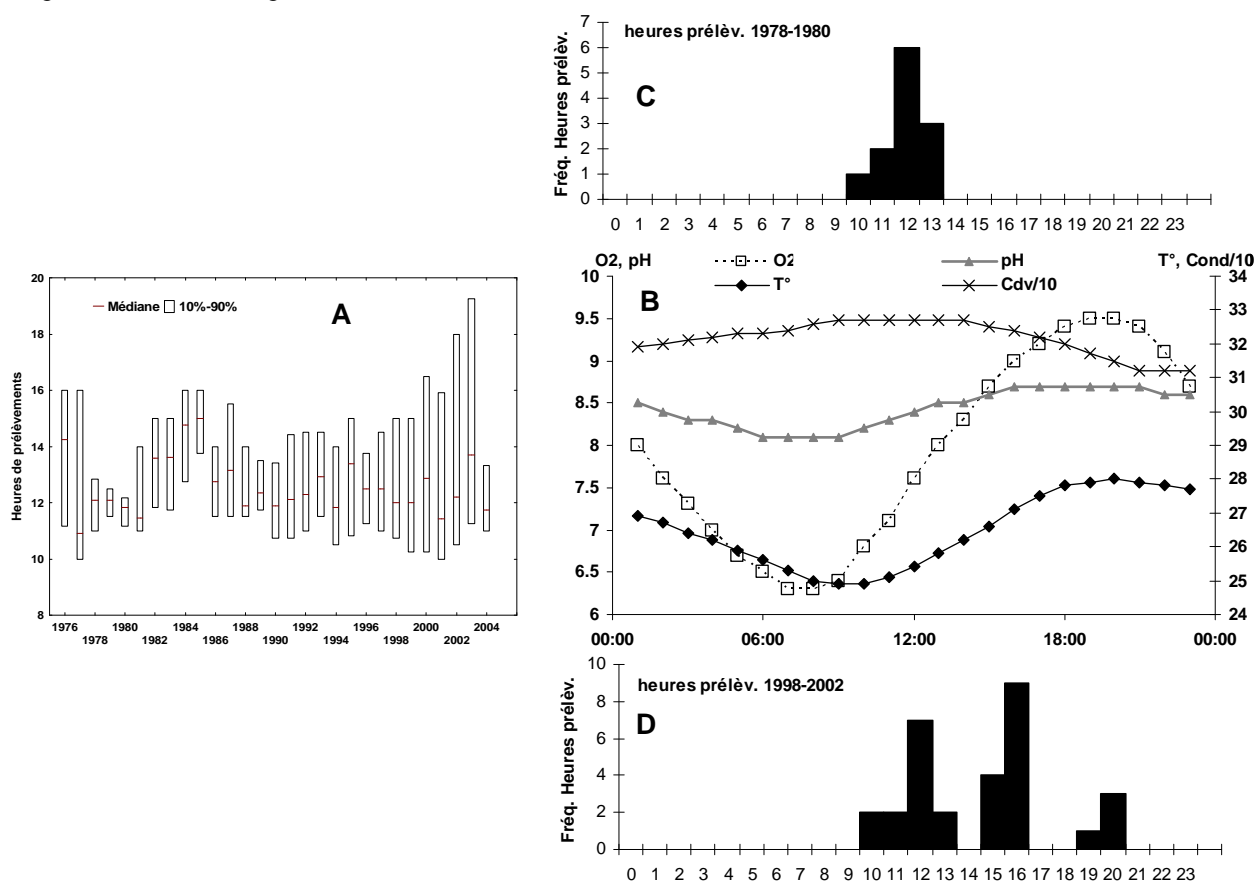


Figure 7. Cycle journalier de qualité des eaux (B) (CNPE, Avoine, amont CNPE, 1/07/2006) et heures de prélèvements pratiquées (A, C et D) à la station RNB Villandry, située à 30 km à l'amont depuis 1976.

## 6. De l'évolution interannuelle à la tendance séculaire

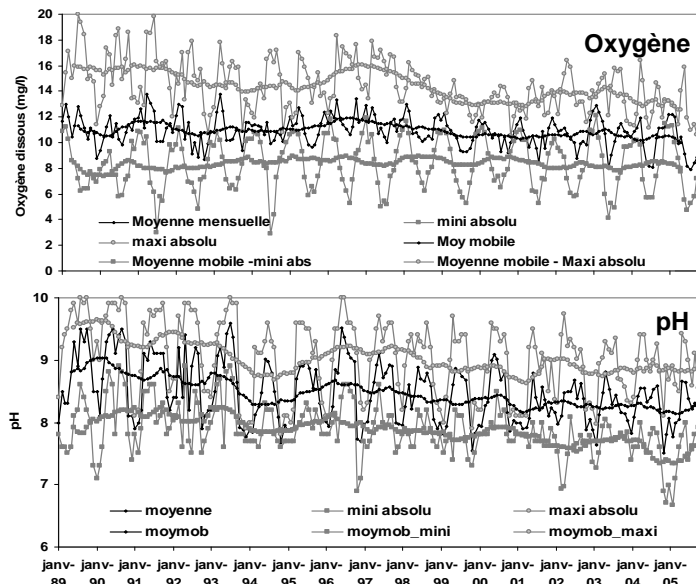
L'évolution interannuelle de la qualité des fleuves a de multiples facteurs : i) la distribution des débits : débits mensuels, puissance et la position des crues dans l'année qui contrôlent la dilution des sources ponctuelles, l'entraînement des MES, ii) la distribution de l'ensoleillement, qui contrôle les régimes thermiques et de production algale à l'échelle de la journée et de la saison. Ces variations interannuelles sont particulièrement bien illustrées par les chroniques de flux de matières. Nous choisissons ici de considérer la distribution des extrêmes (pH, O<sub>2</sub>, T°) qui ne peut être étudiée que sur des séries continues.

### 6.1. Evolution 1989-2005 des valeurs extrêmes de pH et O<sub>2</sub> et des amplitudes thermiques journalières

L'analyse des données d'oxygène dissous et pH mesurées en continu permet d'apporter des informations nouvelles sur l'évolution des valeurs extrêmes car les valeurs centrales ne varient pas significativement. Les valeurs d'oxygène dissous maximales et minimales de chaque mois sont présentées avec les moyennes



mensuelles pour l'oxygène dissous et le pH (Figure 8). Pour l'O<sub>2</sub> la moyenne mobile des minimum absolus journaliers de chaque mois et la moyenne mensuelle sont stables. Par contre la moyenne mobile du maximum absolu, qui est très lié à la production primaire, décroît de 16 mg/l en 1989/1992 à 13 mg/l en 2003/2005. Cette chute significative est à relier à une diminution des pics de production algale, par ailleurs, difficile à mettre en évidence avec un suivi mensuel ou bimensuel de chlorophylle. Cette diminution de l'eutrophisation est confirmée par la tendance des pH pour lesquels cette fois les moyennes mobiles de 3 métriques (min et max absolus, moyenne mensuelle) sont toutes en décroissance.

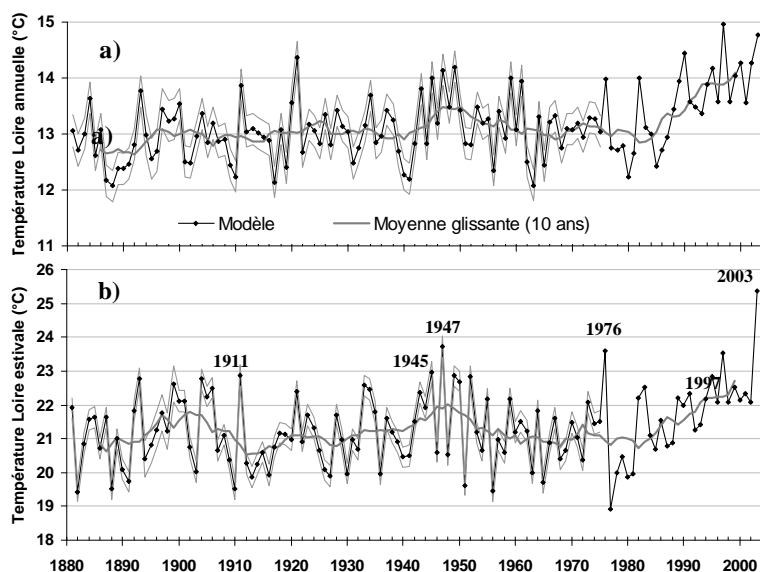


**Figure 8. Moyennes mensuelles d'oxygène dissous et du pH des valeurs minimales et maximales journalières et les minima et maxima absolus correspondants pour chaque mois. station Avoine, contrôle O**

L'amplitude thermique journalière a également fait l'objet d'une étude sur 1990-2005 à Avoine. Il n'y a pas de tendances à moyen terme sur cette période ni sur la saisonnalité des Deltat Tj ni sur les moyennes annuelles, ni sur les valeurs extrêmes de chaque mois. En hiver les Delta Tj peuvent varier entre 0 et 1.5°C et en été elles sont de 1 à 5.5 °C. On remarque par contre qu'il y a des groupes d'années où l'amplitude thermique journalière est plus marquée surtout en été (par exemple 1996 à 1998 et 2002 – 2003 qui correspondent à des années de faibles débits estivaux).

## 6.2. Evolution des températures 1881– 2005

L'étude de la variation séculaire de la température de la Loire moyenne a pu être faite sur la base d'un modèle reliant la température de l'eau à celle de la température atmosphérique et des débits [20]. Pour la période de suivi de la Loire qui a commencé en 1976 par EDF on note une augmentation des températures moyennes annuelles significative +1.9 °C qui serait impossible de mettre en évidence avec les seuls suivis mensuels et bimensuels, effectués de plus à des horaires variables par le RNB



**Figure 9. Evolution des températures de la Loire moyenne depuis 1881 : a) moyennes annuelles, b) moyennes estivales (juin à août). Un intervalle de un écart type d'erreur autour des valeurs estimées par le modèle (1881-1975) est représenté. La courbe de lissage représente une moyenne glissante de période 10 ans - illustration des contrôles F et P [20]**

L'évolution de la température estivale est encore plus marquée que celle de la température annuelle (+ 3°C). Cette étude met aussi en évidence deux cycles interannuels de réchauffement entre 1900 et de 1950 dont l'amplitude était de 0.5° au maximum pour la moyenne annuelle et de + 1°C pour la température estivale. Il semble donc que la période de réchauffement actuelle (1980 – 2003) excède par son amplitude, la variabilité du siècle dernier.

## 7. Conclusion

La variabilité journalière de la qualité des eaux est une composante importante de la variabilité temporelle générale, mais rarement analysée. En utilisant les chroniques de relevés en continu, c'est-à-dire archivés au pas de temps horaire – effectués aux CNPE d'EDF sur la Loire moyenne on observe les points suivants (voir Tableau 1). Les métriques pour apprécier la temporalité sont multiples et s'apparentent aux métriques utilisées en climatologie telles que : i) amplitudes journalières et saisonnières, ii) moyennes journalières, mensuelles, saisonnières, annuelles, iii) minimum et maximum journaliers, iv) fluctuations interannuelles, v) tendances à moyen et long terme, etc. :

- Chaque processus régulant T°, O2, pH et conductivité doit être défini par des métriques les plus appropriées que nous n'avons ici que ébauchées. Les variations interannuelles et tendances doivent être étudiées sur leurs métriques spécifiques. L'amplitude journalière moyenne estivale (1 juillet au 31 août) ( $\Delta x$ ) en O2 et en pH est une métrique à explorer pour l'évolution de l'eutrophisation,
- Dans ce tronçon très eutrophe la variabilité journalière est extrême et s'observe de mars à octobre avec un maximum en été,
- Les quatre indicateurs analysés ont une variabilité journalière relative (amplitude journalière/moyenne journalière) dans l'ordre suivant (valeurs estivales typiques) :  $H^+ > O_2 > pH > T^\circ > \text{conductivité électrique}$
- Pour O2 et pour le pH les variations journalières relatives estivales sont beaucoup plus élevées que les variations saisonnières relatives
- Les organismes aquatiques sont donc soumis à des variabilités très élevées à des périodes coïncidant souvent avec celles de leur reproduction (œufs, alevins, juvéniles). Il est donc réducteur de baser les relations de stress des organismes à l'oxygénation, du pH, voire même à la température sur des valeurs moyennes ou des relevés pris entre 9 et 19 h.
- Suivant la tournée de la surveillance, la qualité des eaux est tantôt appréciée à horaires fixes, tantôt à des horaires très variables entre 9 et 19h ce qui peut induire soit des biais soit des imprécisions prononcés,
- Les mesures discontinues de T°, O2, pH et conductivité même à très haute fréquence (hebdomadaire ou journalière) ne permettent pas d'établir des variations saisonnières soient fixes  $\pm 1h$  et les valeurs observées redressées des biais possibles par rapport aux moyennes journalières.

**Tableau 1. Variabilité temporelle des indicateurs en continu (T°, O2, pH, conductivité) de la qualité des eaux. Exemple de la Loire moyenne (O2, pH, Conductivité : 1989-2005 ; température : 1976-2003 ; Avoine)**

	T° (°C)		O2 (mg/l)		pH		Cond (µS/cm)		% Sat O2max
	x	$\Delta x$	x	$\Delta x$	x	$\Delta x$	x	$\Delta x$	x
<b>Moyenne annuelle</b>	14.2		10.9		8.4		287		105
<b>Moyenne estivale (1)</b>	22		9.5		8.8		240		145 (2)
<b>Amplitude journalière moyenne estivale (1)</b>		2.4		4.5		0.7		17	
<b>Amplitude journalière maximale estivale moyenne (5)</b>		3.8		7.4		0.9		26	
<b>Amplitude saisonnière moyenne (6)</b>		17		2.4		1.0		59	
<b>Variation interannuelle estivale</b>									
Valeur année sèche 1997		2.6		5.7		0.8		22	
Valeur année humide 2001		2.25		4.0		0.6		17	
<b>Tendance période</b>	1976/2003		1993/2005		1993/2005				1993/2005
<b>1<sup>er</sup> intercept (3)</b>	21.2 (1)				9.2 (1)				163 (2)
<b>2<sup>ème</sup> intercept (4)</b>	23.6 (1)				8.3 (1)				126 (2)

(1) Moyenne estivale comptée du 1 juillet au 31 août ; (2) moyenne 1 juillet – 31 août des max journaliers de saturation, (3) et (4) intercepts pour le début et la fin de la période de la droite de regression des valeurs annuelles pour chaque

métrique, (5) déciles supérieur des amplitudes journalières estivales, (6) écart entre le minimum et le maximum des médianes des valeurs journalières moyennes de chaque mois sur la période d'étude

## Références

- [1] Meybeck, M., 2002. Riverine quality at the Anthropocene: Propositions for global space and time analysis, illustrated by the Seine River, *Aquat. Sci.* 64: 376 – 393.
- [2] Gurnel, A.M., Hannah, D., Lawler, D (1995). Suspended sediment yield from alpine glacier basins. *IAHS Publication* 236, 97-104.
- [3] Mano V, Moatar F, Coynel A, Etcheber H., Ludwig W, Meybeck M, Nemery J., Poirel A, Blanc G, Schafer J. (2006a). Space and time variability of suspended particulate matter (SPM) transport in 32 French rivers (100 to 100 000 km<sup>2</sup>; daily to yearly). In “Sediment dynamics and hydromorphology of fluvial systems”, ICCE IAHS International Symposium, 3-7 July 2006, Dundee, Scotland, (Poster Report Booklet), pp 29-37.
- [4] Billen G, Garnier J, Brion N, Sanchez N. 1998. Les transformations bactériennes de l'azote. In *La Seine en son Bassin. Fonctionnement Ecologique d'un Système Fluvial Anthropisé*, Meybeck M, de Marsily G, Fustec E (eds). Elsevier : Paris ; 567-593.
- [5] Murdoch, P, Shanley, B (2006). Detection of water quality trends at high, median and low flow in a Catskill Mountain stream, New York, through a new statistical method. *Water Resources Research*, vol.42, W08407, doi:10.1029/2004WR003892, 2006.
- [6] Webb B.W., 1996. Trends in stream and river temperature, *Hydrological processes*, 10, 205-226.
- [7] Serrat P, Ludwig W, Navarro B, Blazi J.-L (2001). Variabilité spatio-temporelle des flux de matières en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen : la Têt (France). *C.R. Acad. Sci. Paris, Earth and Planetary Sciences* 333 : 389-397.
- [8] Even S, Poulin M, Mouchel J.-M, Seidl M., Servais P. (2004). Modelling oxygen deficits in the Seine River downstream of combined sewer overflows. *Ecological Modelling*, 173, 2-3 : 177-196.
- [9] Estèbe, A, Boudries H, Mouchel J.-M, Thévenot D. (1997). Urban runoff impacts on particulate metal and hydrocarbon concentrations in river seine : Suspended solid and sediment transport. *Water Science and Technology*, 36(8-9): 185-193.
- [10] Moatar F., Poirel A, Obled Ch. (1999). Analyse de séries temporelles de mesures de l'oxygène dissous et du pH sur la Loire au niveau du site nucléaire de Dampierre (Loiret) : 1. Compréhension des variations temporelles des teneurs en oxygène dissous et du pH en relation avec des données hydrométéorologiques. *Hydroécologie Appliquée*, Tome ½, vol. 11, pp 127-151.
- [11] Burt, 2003. Monitoring change in hydrological systems. *The Science of the Total Environment* 310 : 9-16.
- [12] Moatar F and Meybeck M, 2005. Compared performances of different algorithms for estimating annual nutrient loads discharged by the eutrophic River Loire. *Hydrological Processes*, 19: 429-444.
- [13] Lair N, Reyes-Marchant P, 2000. Evaluation hydroécologique de la qualité des eaux de la Loire moyenne, réalisée de 1977 à 1998 sur le site de la centrale de Saint-Laurent des Eaux (France). Bilan et perspectives. *Hydroécol. Appl.*, Tome 12, vol 1-2, pp: 1-66.
- [14] Lair, N, Sargos, 1993. A 10 years study in the middle course of the River Loire. I Patterns of change in hydrological physical and chemical variables at the sites of nuclear power plants in relation to algal biomass. *Hydroécologie Appliquée* 5: 1-27.
- [15] Picard V, Lair N, 2005. Spatio-temporal investigations on the planktonic organisms of the Middle Loire (France), during the low water period: biodiversity and community dynamics. *Hydrobiologia*, 551: 69-86.
- [16] Sebilo, M., Billen, G. (et al.) (2006). Assessing nitrification and denitrification in the Seine River and estuary using chemical and isotopic techniques. *Ecosystems*, Springer New York, 31.05.2006, vol. 9, no. 4, pp. 564-577
- [17] Manickam S, Barbaroux L, Ottmann F (1985) Composition and mineralogy of suspended sediment in the fluvio-estuarine zone of the Loire river, France. *Sedimentology* 32, 721-741.
- [18] Grosbois, C (1998). Géochimie des eaux de la Loire: contributions naturelles et anthropiques. Quantification de l'érosion. Université de Tours, 232 pages+annexes.
- [19] Moatar, F., Modélisations statistiques et déterministes des paramètres physico-chimiques utilisés en surveillance des eaux de rivières : Application à la validation des séries de mesures en continu. Cas de la Loire Moyenne. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 290 pg.
- [20] Moatar F., J. Gailhard (2006). Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *C.R. Geosciences (Hydrology-Hydrogeology)*. 338 : 319-328.

**Remerciements :** Ce travail a été soutenu financièrement par les projets VARIFLUX et VARIQUAL (programme EC2CO- CNRS/INSU)